近20 a河西地区绿洲效应时空变化特征及归因分析

侯文兵[1,2,3]， 李开明[1,2,3,4]， 黄 卓[1,2,3]

（1. 兰州交通大学测绘与地理信息学院，甘肃 兰州 730070；2. 地理国情监测技术应用国家地方联合工程研究中心，甘肃 兰州 730070；3. 甘肃省地理国情监测工程实验室，甘肃 兰州 730070；4. 兰州城市学院城市环境学院，甘肃 兰州 730070）

摘 要：绿洲效应在改善干旱区气候，支持绿洲系统自我维持和发展等方面发挥着极为重要的作用。本文以甘肃省河西地区为研究区，利用气象和遥感数据，选取绿洲效应强度指标，采用地理探测器模型，揭示近20 a绿洲效应时空变化特征，分析了绿洲效应强度影响因素。结果表明：(1) 2000—2020年期间，研究区绿洲效应强度在春夏冬季均呈增大趋势，秋季呈减小趋势，白天与相应季节变化相似，但强度更大，最强为夏季，增加1.43 ℃；夜间春夏秋季变化与相应季节相似，但强度较低，2000年秋季和2010年冬季夜间出现微弱的绿洲暖岛效应；(2) 强绿洲效应（“冷岛”）面积占比在夏季最大且变化较小，而绿洲“暖岛”效应面积占比冬季最大，呈逐年减小趋势；(3) 夏季绿洲效应强度与绿洲的植被覆盖变化具有强负相关性，相关系数达-0.917。气候和地表因素是河西地区绿洲效应强度的主控因素，地表反照率的影响最弱，且因子间的交互作用不容忽视。

关键词：绿洲效应；时空变化；归因；地理探测器；河西地区

绿洲作为干旱区独有且重要的生态地理单元，是干旱区人类生产生活的基础条件，是区域生态环境保持稳定的重要“调节器”。绿洲生态系统在对抗干旱气候环境强迫的过程中所表现出来的一系列独特的小气候特征，统称其为“绿洲效应”[1-2]。

国际上Oke[3]在1987年首先提出绿洲冷岛效应，同期，国内学者苏从先等[2]通过近地面野外观测，提出了绿洲“冷岛效应”的形成机制。此后，Bie等[4]基于多源数据，通过研究河西绿洲，揭示了绿洲效应存在的“冷岛”和“暖岛”效应双重特性。目前，绿洲效应的研究方法主要有常规方法和遥感技术两大类，常规方法一般以地面实测和空间数值模拟为主，基于各种气象资料，通过数学方法对绿洲效应分析。与常规方法相比，遥感数据获取快捷简便，时空分辨率更高，逐渐成为研究地表冷热环境的主要方法，并得到了较广泛的应用。例如Hao等[5]基于遥感数据，利用地理统计等方法研究了塔里木盆地绿洲的冷岛效应，指出夏季绿洲“冷岛效应”强度最大，秋季次之；同年Hao等[6]基于MODIS LST和气象数据，研究绿洲效应和气温的关系，发现绿洲“冷岛效应”主要发生在夏季，且气温上升的原因是绿洲效应强度的降低；毋兆鹏等[7]基于Landsat遥感数据反演地温，研究了新疆精河流域绿洲的冷岛效应，表明绿洲耕地、草地、林地及水体对绿洲“冷岛效应”产生了积极影响，且降水是影响绿洲冷岛效应变化的主要外部因素；高原等[8]利用遥感和气象数据研究石河子绿洲冷岛效应变化和影响因子，发现NDVI与地表温度存在显著负相关，社会经济发展也是影响绿洲冷岛效应变化的重要因子。Hao等[9]利用土壤湿度与多种遥感数据，研究新疆绿洲效应的上限和机制，认为土壤湿度是干旱区绿洲效应的决定因素，土壤湿度变化控制着荒漠和绿洲之间地表蒸散发的差异，从而影响绿洲效应。Bie等[4]基于遥感数据，分析河西绿洲效应的影响因素，认为蒸散发(ET)是生长季绿洲“冷岛效应”的主要因子，反照率(Albedo)是冬季绿洲“暖岛效应”的主要因素。然而，目前大多学者对绿洲效应的研究集中于夏季，对其他季节研究较少，研究不同季节绿洲效应

收稿日期：2023-05-27； **修订日期：**2023-08-29
基金项目：甘肃省科技计划项目(18JR3RA221)；兰州市科技计划项目资助(2023-3-121)
作者简介：侯文兵(1998-)，男，硕士研究生，主要从事绿洲遥感监测及可持续发展研究. E-mail: lanzhou_gishwb@126.com
通讯作者：李开明. E-mail: lkm_wd@126.com

变化特征有助于了解区域气候变化，且相关学者以不同角度分析了土地覆盖、植被、景观格局等与绿洲效应的相互关系，但实际上许多问题都是自然、社会经济多因子交互作用的结果，分析因子间的交互作用与绿洲效应的相互关系，有助于揭示绿洲效应机制。

因此，本文以河西地区作为研究区，在分析不同季节绿洲效应时空变化特征的基础上，采用地理探测器模型探讨绿洲效应的主要驱动因子及交互作用，以期为河西地区生态问题治理和绿洲城市可持续发展提供一定的科学依据。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

河西地区位于亚欧大陆腹地（图1），东临黄土高原，西接塔里木盆地，南与青藏高原毗邻，北与蒙古高原接壤，自东向西依次分布石羊河、黑河和疏勒河三大内陆河流域，行政区划包括武威、金昌、张掖、酒泉与嘉峪关五市。祁连山冰川融雪孕育了河西绿洲，为研究荒漠绿洲生态系统的热环境，突破单一行政区划的限制，本文去除祁连山区的干扰并以绿洲周边荒漠为背景，以河西荒漠绿洲生态单元为研究对象。该区域海拔在643~3900 m之间，年平均气温5~9 ℃，年降水量50~150 mm，年蒸发量1500~3200 mm，气候干旱，土壤多沙，绿洲生态环境面临着严重的威胁[10]。

1.2 数据来源与处理

本文选取2000—2020年MODIS Terra卫星V6版全球地表温度产品（MOD11A2），研究河西地区绿洲效应变化特征及影响因素。该数据产品时间分辨率为8 d，空间分辨率1 km，精度良好，已被广泛应用于地表冷热环境研究[11-12]。

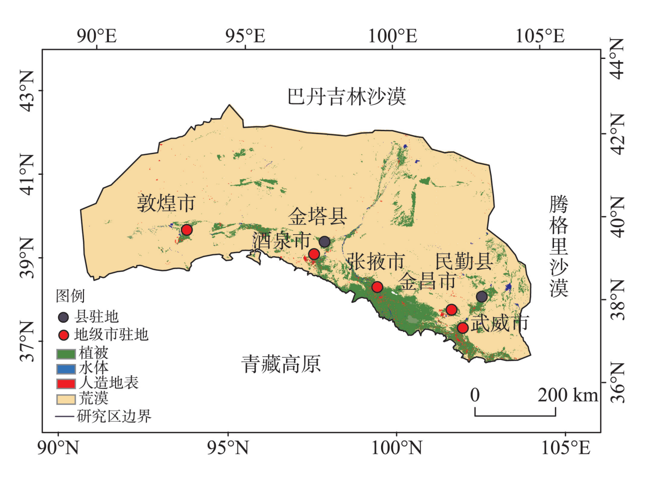


图1 研究区概况图

Fig. 1 Overview map of the study area

土地覆盖数据GlobeLand 30来源于国家基础地理信息中心全球地表覆盖数据产品服务网站(DOI：10.11769)，产品分辨率为30 m。根据绿洲结构定义及其特征[13-15]，将耕地、草地、灌木地、水体、人造地表划分为绿洲的土地覆盖类型（湿地归入水体）。

根据以往研究[4-7]以及数据的可获取性，绿洲效应的影响因素选择综合考虑了土地覆盖、气候、社会经济等因子，并首次将空气质量指标纳入绿洲效应的影响因素研究。所有数据年份为2020年，数据均重采样为1000 m。地表反照率由MOD09A1产品计算[16-17]，NDVI、AOD（气溶胶光学厚度）、O_3（臭氧）数据分别来自MOD13A2、MCD19A2、COPERNICUS/S5P/NRTI/L3_O3产品。人口密度数据来源于Worldpop（https://www.worldpop.org/）。气温、降水、土壤湿度、夜间灯光数据均来源于国家青藏高原科学数据中心(http:// data.tpdc.ac.cn)，分别计算逐日10 cm土壤湿度、逐月气温和降水量栅格数据的年平均值。绿洲矢量数据来源于国家冰川冻土沙漠科学数据中心(http://www.ncdc.ac.cn)。详细数据信息及来源见表1。

1.3 研究方法

1.3.1 绿洲效应强度

（1）绿洲效应强度计算

借鉴已有研究[4-5]计算绿洲效应强度（OEI）方法，以土地覆盖数据和MODIS LST量化绿洲效应强度，绿洲与裸地LST（地表温度）均值之差为绿洲效应强度。绿洲效应强度表征绿洲与荒漠的LST差异，负值为绿洲冷岛效应，正值为绿洲暖岛效应，其绝对值越大则绿洲冷岛（暖岛）效应越强。计算公式如下：

$$OEI = LST_{绿洲} - LST_{裸地} \quad (1)$$

式中：$LST_{绿洲}$和$LST_{裸地}$分别为绿洲（耕地、草地、灌木地、水体和人造地表）与裸地的LST均值。

（2）绿洲效应强度分级

为进一步在空间上分析不同绿洲效应强度及其面积差异变化，依据裸地LST均值对绿洲效应强度进行分级[5]。$LST_{绿洲}$表示绿洲区域LST的像素值，$LST_{裸地}$表示裸地LST均值。分类标准如表2所示。

1.3.2 绿洲效应足迹 本文将受绿洲效应影响的一定区域定义为绿洲效应足迹，即绿洲效应产生的空

表1 数据类型及来源

Tab. 1 Data types and sources

影响因素类别	影响因素	分辨率/m	数据时间	获取途径
地表因素	NDVI	1000	2020年	GEE
	ALB(反照率)	500	2020年	GEE
	GlobeLand 30	30	2000年、2010年、2020年	http://GlobeLand30
	土壤湿度	1000	2020年	http:// data.tpdc.ac.cn
空气质量因素	气溶胶光学厚度(AOD)	1000	2020年	GEE
	臭氧(O_3)	1000	2020年	GEE
气候因素	气温	1000	2020年	http:// data.tpdc.ac.cn
	降水	1000	2020年	http:// data.tpdc.ac.cn
社会经济因素	夜间灯光	1000	2020年	http:// data.tpdc.ac.cn
	人口密度	1000	2020年	https://www.worldpop.org/

表2 绿洲效应强度分级及标准

Tab. 2 Oasis effect intensity grading and criteria

绿洲效应类型	绿洲效应强度分级	分级标准
绿洲“冷岛”效应	强绿洲效应	$LST_{绿洲} < LST_{裸地} - 8$ ℃
	中强度绿洲效应	$LST_{裸地} - 8$ ℃ $\leqslant LST_{绿洲} < LST_{裸地} - 4$ ℃
	弱绿洲效应	$LST_{裸地} - 4$ ℃ $\leqslant LST_{绿洲} < LST_{裸地}$
绿洲“暖岛”效应	绿洲暖岛效应	$LST_{绿洲} \geqslant LST_{裸地}$

间范围[18-19]。在气候变化和人类活动共同影响下，为进一步分析局部绿洲的绿洲效应空间变化情况，利用改进的半径法对绿洲效应足迹进行研究。本文提取绿洲重心，以重心为原点建立多环缓冲区，各圆环面积与初始圆环面积相等，依次确定圆环半径，然后提取同心圆环内的平均LST并绘制环数-LST散点图。由于绿洲边界不规则，圆环同时也会覆盖大量荒漠，从而判断产生绿洲效应范围的具体分界线。具体判别方法为：若散点图中有明显的拐点，且拐点之后的LST变化平缓，则该点对应的圆环范围之内即为绿洲效应足迹。圆环半径计算公式如下：

$$\begin{cases} r_1 = R \\ S_1 = \pi r_1^2 \\ S_2 = \pi r_2^2 - \pi r_1^2 = S_1 \\ \quad \vdots \\ r_i = R\sqrt{i} \end{cases} \tag{2}$$

式中：r_1为初始圆环半径；r_i为第i个圆环半径；S_1和S_2分别为初始圆环面积和第2个圆环面积，其中i为同心圆环序号。

1.3.3 相关分析　相关分析可以揭示地理要素之间相互关系的密切程度，通过对相关系数的计算来反应这种密切程度[20-21]。利用相关性分析，研究绿洲效应与绿洲植被覆盖变化的相关特征。计算公式如下：

$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^{n}(y_i - \bar{y})^2}} \tag{3}$$

式中：r为两要素的相关关系系数，值介于[-1,1]之间，r>0表示正相关，反之为负相关，$|r|$越大表示两要素的关系越密切；x_i和y_i分别为第i年的NDVI与绿洲效应强度；$\bar{x}$和$\bar{y}$分别表示两个变量的平均值；n为研究时段长度。

1.3.4 地理探测器模型　地理探测器可以探测空间分异性，以揭示其驱动力[22]。本文采用分异及因子探测和交互作用探测，因子探测用q指定量分析各潜在驱动因素对河西绿洲效应强度空间分异的解释力大小，q值值域为[0,1]，q值越大代表因子对绿洲效应的影响越大，公式如下：

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2}{N\sigma^2} = 1 - \frac{SSW}{SST} \tag{4}$$

$$SSW = \sum_{h=1}^{L} N_h \sigma_h^2,\ SST = N\sigma^2 \tag{5}$$

式中：$h = 1, \cdots, L$为变量Y或因子X的分类或分

区；N_h和N分别为层h和全区的单元数；σ_h^2和σ^2分别是层和全区的Y值的方差；SSW和SST分别为层内方差之和和全区总方差。

交互作用探测用于识别不同因子之间的交互作用，即评估两因子共同作用时对因变量的解释力，交互关系分为五类[22]。

2 结果与分析

2.1 2000—2020年河西地区绿洲效应时间变化特征

2.1.1 绿洲效应季节变化特征 由图2表明，2000年、2010年和2020年河西绿洲的绿洲效应强度在不同季节具有明显差异。不同年份季节的绿洲效应均表现为绿洲“冷岛”效应，且夏季强度最大，春秋次之，冬季最弱。在研究时间段，春季绿洲效应强度先减后增；夏季持续增加，从2000年的−4.7 ℃增加到2020年的−6.13 ℃；秋季先增后减，2000—2020年分别为−1.74 ℃、−2.63 ℃和−2.34 ℃。冬季呈微弱增加，绿洲效应强度分别为−0.28 ℃、−0.6 ℃和−0.9 ℃。

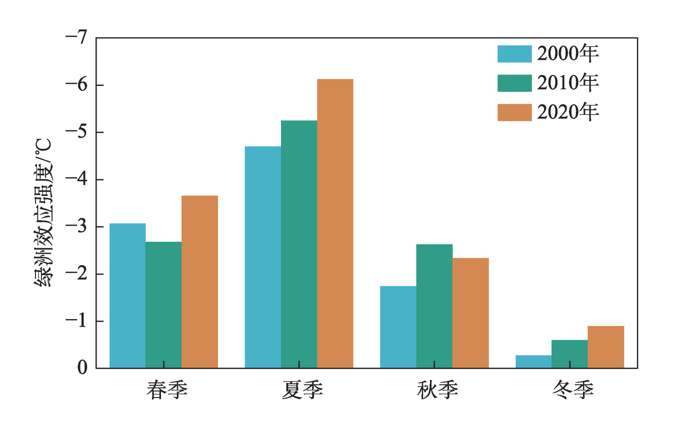


图2 2000—2020年河西绿洲不同季节绿洲效应强度变化

Fig. 2 Variation of the intensity of oasis effect in different seasons in the west of the river oasis from 2000 to 2020

2.1.2 绿洲效应昼夜变化特征 绿洲效应在白天和夜间具有不同的变化特征(图3)。白天均表现为绿洲“冷岛”效应且强度较大，与相应季节的变化特征相似。研究期内，白天各季节绿洲效应强度均表现为增大趋势，春季变化较小，2000年为−4.43 ℃，2010年为−4.52 ℃，2020年为−5.37 ℃；夏季绿洲效应强度每年以近1 ℃增强，2020年最大为−9.52 ℃；秋冬季呈现微弱增强，但变化幅度不大。

相较白天，夜间绿洲效应强度较低，春季先减后增，夏季呈增加趋势；2000年秋季表现出微弱绿洲“暖岛”效应，但强度较低为0.005 ℃，2010年变为绿洲“冷岛”效应，在2020年减弱至−0.36 ℃；冬季绿洲效应从“冷岛”变为“暖岛”，2020年又变为冷岛，绿洲效应强度较弱。

2.2 2000—2020年河西地区绿洲效应空间变化特征

2.2.1 绿洲效应空间变化特征 绿洲效应强度空间分布如图4所示，河西地区季节绿洲效应强度空间分布表现为：夏季强绿洲效应面积占比最大，冬季最小，春秋次之；中强度绿洲效应强度面积占比春夏秋季相近，冬季最小；弱绿洲效应面积占比秋季最大，夏季最小；绿洲暖岛效应面积占比冬季最大，春夏秋季相近。2000年、2010年和2020年，夏季4个等级绿洲效应强度面积占比和空间分布变化均不大，强绿洲效应主要集中于黑河流域的张掖绿洲和石羊河流域的武威绿洲。从表3可以看出，研究期间，冬季绿洲暖岛效应面积占比分别为46.6%、

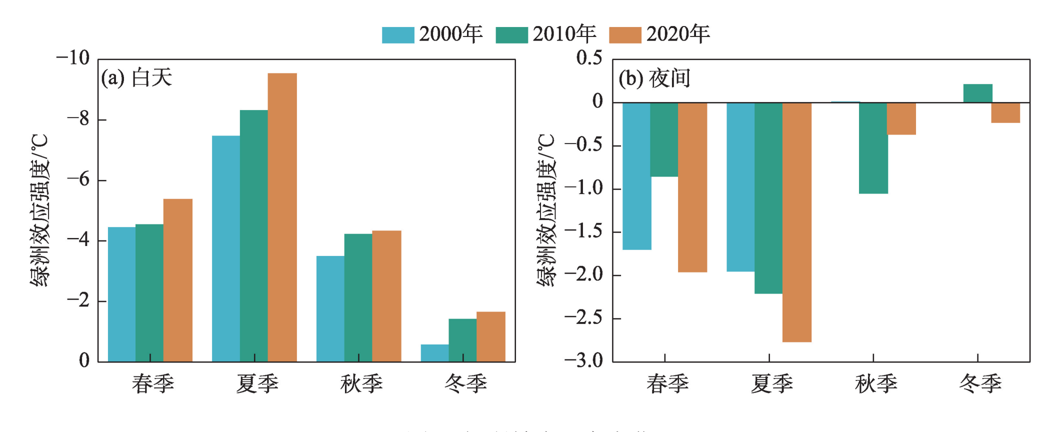
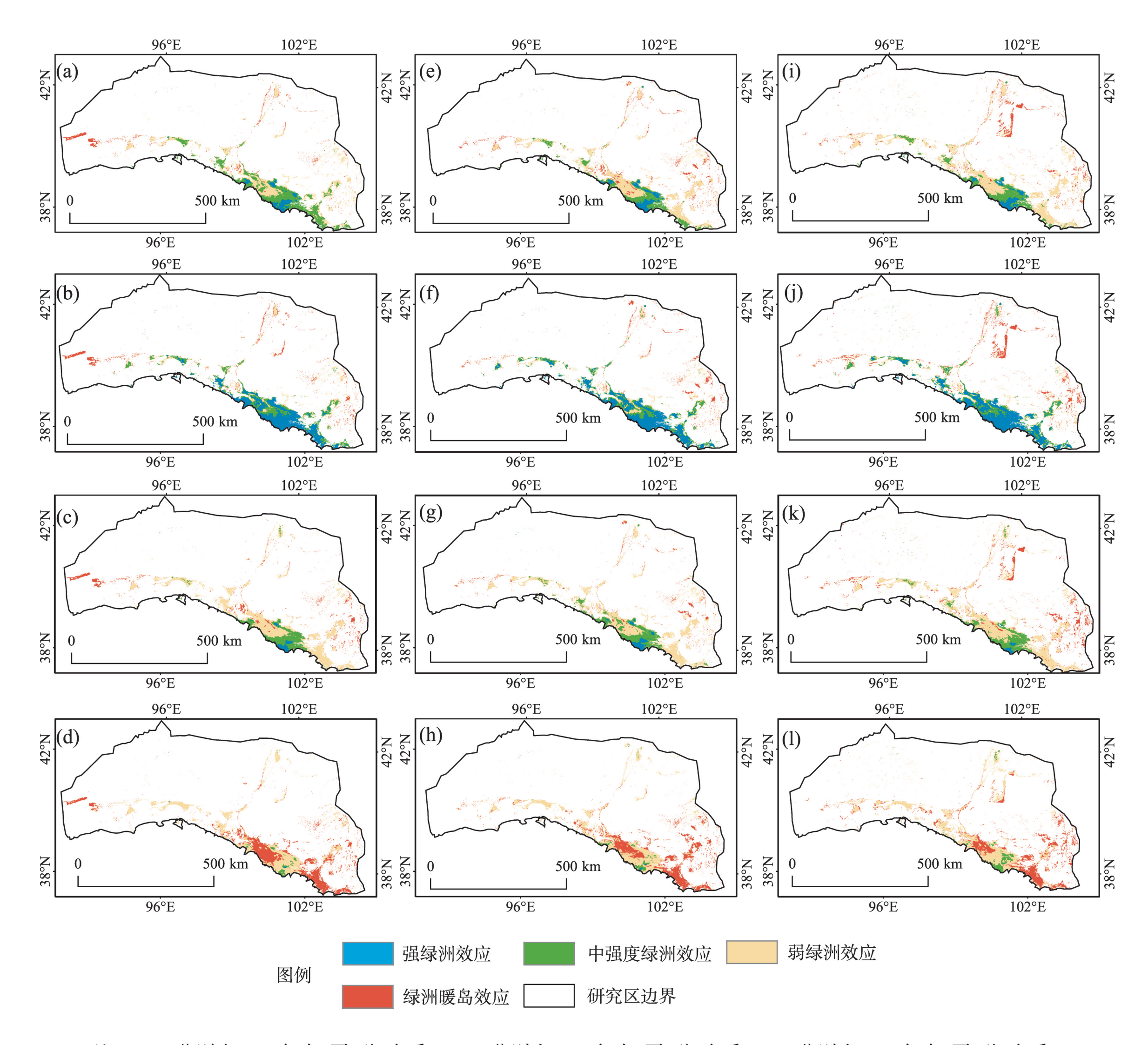


图3 绿洲效应昼夜变化

Fig. 3 Diurnal variation of the oasis effect



注:(a)~(d)分别为2000年春、夏、秋、冬季;(e)~(h)分别为2010年春、夏、秋、冬季;(i)~(l)分别为2020年春、夏、秋、冬季。

图4　河西地区2000年、2010年、2020年四季绿洲效应强度空间分布

Fig. 4　Spatial distribution of the intensity of the oasis effect in the four seasons of 2000, 2010 and 2020 in the west of the river

表3　绿洲效应强度面积占比

Tab. 3　Oasis effect intensity area share

季节	年份	强绿洲效应/%	中强度绿洲效应/%	弱绿洲效应/%	绿洲暖岛效应/%
春季	2000年	7.9	42.9	39.7	9.3
	2010年	10.1	25.4	51.4	12.9
	2020年	7.6	24	54.9	13.4
夏季	2000年	41.8	29.4	17	11.6
	2010年	42.4	29.4	18.1	9.9
	2020年	41.2	26.5	15.7	16.4
秋季	2000年	3.4	21.8	60	14.6
	2010年	5.3	26.5	59.9	8.2
	2020年	1.7	20.5	59.2	18.4
冬季	2000年	0.18	3.3	49.8	46.6
	2010年	0.33	4.5	50.2	44.8
	2020年	0.03	7.2	54.1	38.5

44.8%和38.5%,呈逐年减小趋势,该等级主要分布于整个石羊河流域和部分张掖绿洲,可能与张掖与武威市人为热排放较多有关;春秋季,绿洲内部及周边稀疏草地区域存在绿洲暖岛效应,但面积占比较少,春秋季分别增加4.1%和3.8%。

2.2.2 *绿洲效应足迹* 以民勤和敦煌绿洲为例,提取绿洲质心,使圆环覆盖整个绿洲。经多次试验,最终确定敦煌绿洲同心圆环初始半径为4 km,圆环数为40环;民勤绿洲同心圆环初始半径为6 km,环数为60环。如图5所示,民勤绿洲夏季LST随环数增加而快速增加,之后呈下降趋势,当环数达到20时,又呈现明显增加趋势。敦煌绿洲夏季LST随环数增加呈现快速增加,当环数为10环时,呈缓慢增加趋势。

分析绿洲内部结构表明,民勤绿洲在10环处LST有一小段下降,但该点处并不是拐点,其原因为民勤东北侧绿洲内部有一片裸地,导致圆环LST均值较高,但圆环超过10环又经过上半部分绿洲,导致圆环LST均值又下降。2000年民勤绿洲在45环处出现拐点,且之后LST变化趋于平缓,2020年的拐点在50环,绿洲效应范围有一定扩张。相较民勤绿洲,由于敦煌绿洲面积较小,其绿洲效应范围较小,且20 a间,拐点大致均在10环位置,无明显变化,表明绿洲生态条件处于稳定状态。

2.3 影响因素分析

2.3.1 *土地覆盖变化的影响* 为探究人类活动对绿洲的影响,基于GlobeLand 30土地覆盖数据,研究20 a间研究区土地覆盖变化。如图6和表4所示,2000—2010年,人类活动对河西绿洲的影响较小,人造地表大约增加6 km²;2010—2020年,随城市快速发展,人类活动对绿洲覆盖变化影响剧烈,人造地表面积快速增长至2395 km²,武威和张掖绿洲的增加最为显著,其主要由耕地和裸地转换而来,转换面积约1500 km²,人口增长和经济发展带来绿洲扩张。且大量裸地转变为耕地、草地、灌木地和建设用地,总计转换面积为5348 km²,不同绿洲覆盖互相转换。在过去20 a间,水体、耕地等均呈增加趋势,而荒漠呈先增后减趋势,总计减少4821 km²。由此可见,河西绿洲周边的环境治理已见成效,绿洲的生态环境变好对绿洲效应的增强产生了积极的影响。

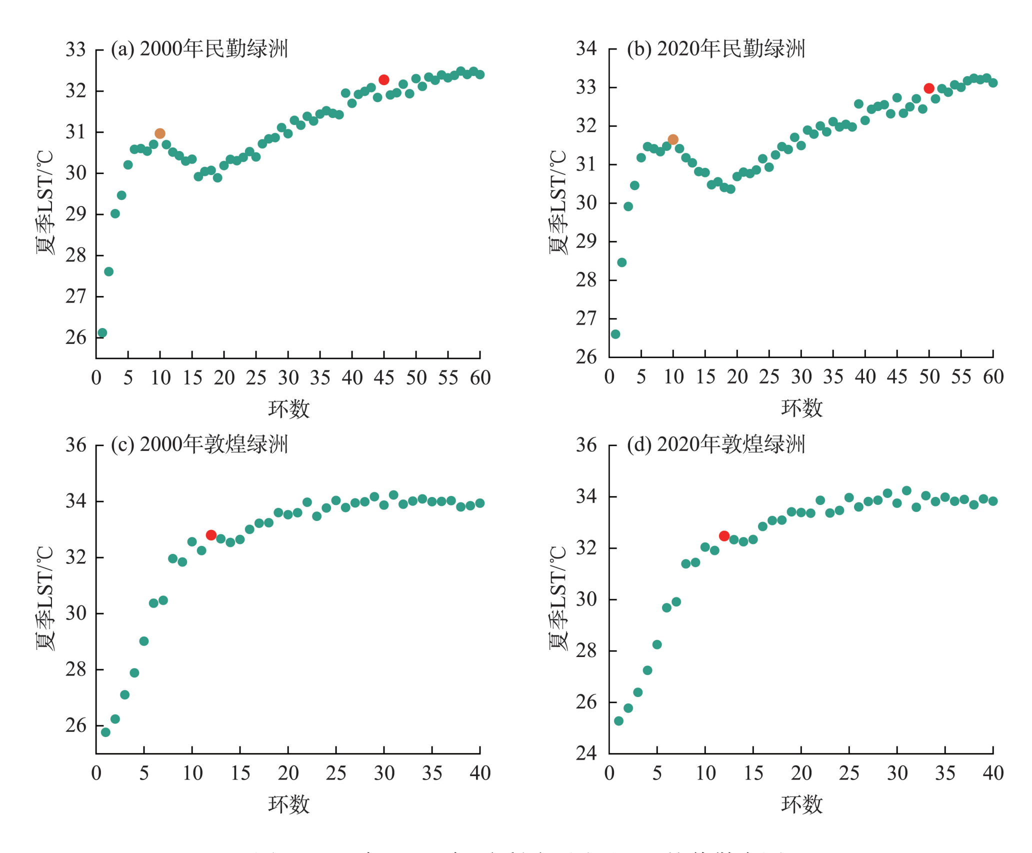


图5 2000年、2020年夏季同心圆环LST均值散点图

Fig. 5 Scatterplot of LST mean values of concentric rings in summer 2000 and 2020

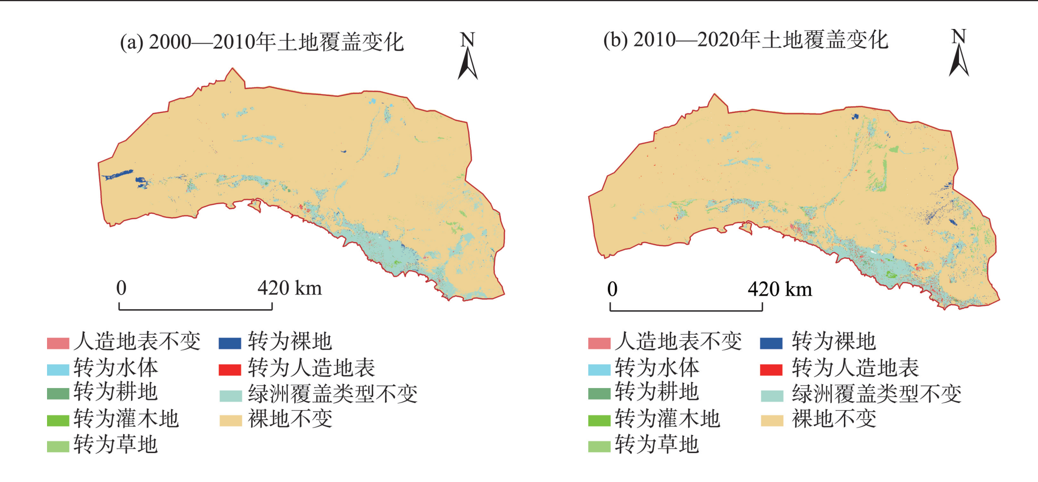


图6 河西绿洲土地覆盖的空间变化

Fig. 6 Spatial variation of land cover in the west of the river oasis

表4 河西绿洲土地覆盖面积变化

Tab. 4 Land cover changes in the west of the river oasis

年份	土地覆盖类型面积/ km²					
	耕地	草地	灌木地	水体	人造地表	荒漠
2000年	15170	20042	658	1151	777	358692
2010年	15670	19180	748	1121	783	359013
2020年	15835	22192	842	1270	2395	353871

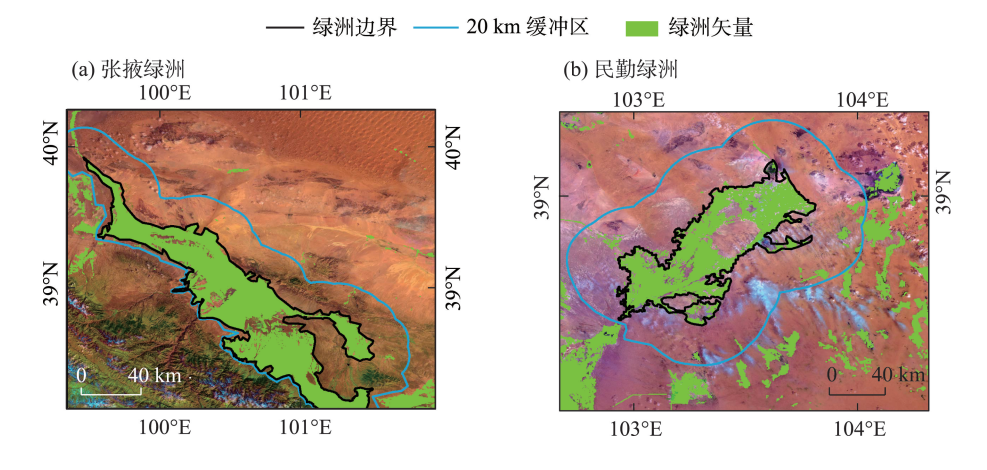


图7 绿洲和荒漠边界的范围

Fig. 7 Extent of oasis and desert boundaries

2.3.2 绿洲效应对绿洲植被覆盖变化的响应　如图7所示，基于土地覆盖和绿洲矢量数据，确定2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的河西绿洲边界及荒漠边界，并向外做20 km缓冲区[5-23]作为荒漠背景，排除山区部分。通过对缓冲区各年植被生长季的NDVI进行统计，张掖和民勤绿洲周边荒漠多年均值分别为0.12、0.1，说明20 km缓冲区能较好代表各绿洲周边荒漠区域。基于缓冲区，研究河西绿洲整体和绿洲局部(张掖和民勤)的绿洲效应强度和绿洲区NDVI变化的响应关系。

由于绿洲在夏季可以调节区域气候，在高温天气和极端高温日数增多时，绿洲冷岛效应可产生舒适生活环境。由图8可知，2000—2020年，河西整体绿洲、民勤和张掖绿洲的绿洲效应强度均呈增强趋势，民勤绿洲多年平均冷岛效应强度较低，为−7.4 ℃。由于张掖绿洲生态环境较好，因此，具有很强的冷岛效应，多年平均冷岛效应强度为−11.23 ℃，与张掖市生态湿地公园和生态城市建设

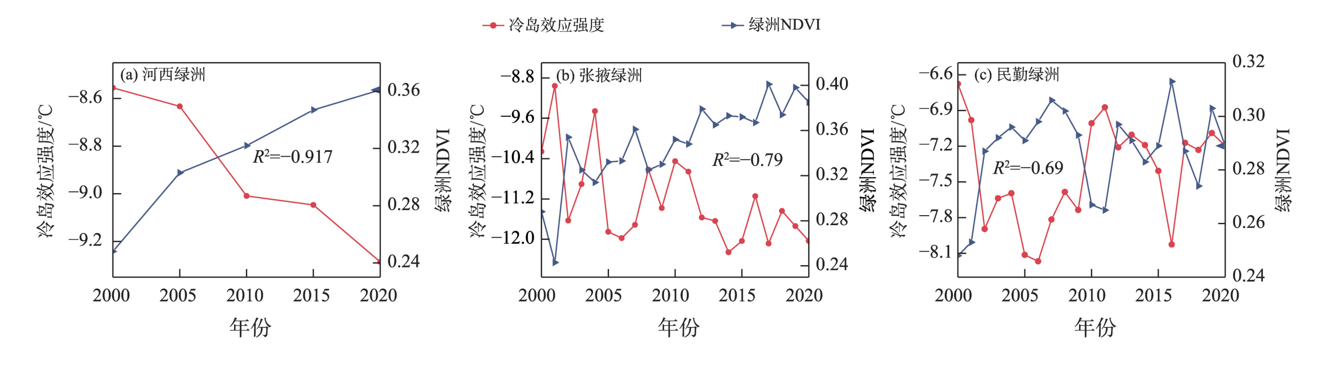


图8 绿洲植被覆盖对绿洲效应的响应

Fig. 8 Response of oasis vegetation cover to oasis effect

有着紧密的联系。

通过提取绿洲夏季NDVI均值，探究绿洲冷岛效应强度与NDVI变化的响应关系。发现民勤绿洲区的植被覆盖较低，多年平均NDVI值仅0.29，张掖多年NDVI均值为0.39。低植被覆盖度意味着民勤土壤干旱，尤为缺水，土地荒漠化等一系列问题，使得绿洲对抗荒漠气候的能力变低。从图8还可以发现，无论是整个河西绿洲还是局部绿洲，绿洲效应强度与NDVI值变化的曲线具有强对应关系，NDVI变化，其冷岛效应强度也相应变化，存在显著负相关关系，且绿洲效应强度与绿洲的NDVI变化的相关系数R^2分别为−0.917、−0.79和−0.69，$P<0.005$。这说明绿色植被是影响绿洲冷岛效应非常重要的因素之一，合理规划绿洲城市结构，增加城市绿地有利于绿洲效应增强。

2.3.3 河西绿洲效应强度的主要驱动因素及交互作用 以2020年为例，利用因子探测定量分析10个驱动因子对河西绿洲效应强度的影响（q统计量）。结果如表5所示，气候因素、植被覆盖、土地覆盖类型和土壤湿度对河西绿洲效应强度的影响较大。降水影响地表径流的形成，决定地表土地覆盖的特征，同时给予植被良好的生长环境，绿洲效应得到显著增强，可见气候对于绿洲效应有着极大的影响；地表反照率和社会经济因素对于绿洲效应强度影响较小，可能是年际尺度上荒漠绿洲的反照率差异不明显，河西地区整体城市化水平较低导致；最后空气质量指标O_3和AOD对绿洲效应强度有一定的影响。

利用交互探测检验10个驱动因子之间的交互作用（图9）。结果显示，任意两驱动因子间的交互作用均表现为双因子交互增强关系，且交互作用均大于单因子对荒漠绿洲LST分异的解释力。气温与其他因子的交互作用最为显著，其与NDVI的交互q值最大为0.742，反映出气温与植被的共同作用对绿洲效应影响最为显著，其次是气温与土地覆盖的交互q值（0.709）。O_3与气温、NDVI、土壤湿度、AOD等因子的交互作用要显著高于其单因子的解释力。

3 讨 论

选取民勤和敦煌绿洲，对其绿洲效应足迹进行研究发现，相较城市热岛足迹[18]，绿洲效应足迹在2000—2020年时间段内变化较为稳定。主要原因是：一方面绿洲城市与经济快速发展的大城市相比，其人口增长缓慢，工业产业较少，且国家重视其持续保护和建设；另一方面，绿洲环境总体呈恶化趋势。造成绿洲面积不会快速增长或减少，因此，产生绿洲效应区域不会快速扩张和缩小。针对此现象，可采取在荒漠-绿洲过渡带附近建造防护林的方式，种植梭梭等优势种[24−25]，抵御荒漠风沙侵袭，防止绿洲区内水土流失[26−27]，维持绿洲的正常生产生活和实现绿洲城市的可持续发展。

绿洲效应是行星边界层内一种特有的气候现象，在绿洲节水和农业发展等方面具有重要的生态意义。已有研究表明，由于荒漠与绿洲的物质组

表5 绿洲效应强度驱动因素地理探测分析

Tab. 5 Geodetection analysis of the drivers of the intensity of the oasis effect

因子类型	LULC	夜间灯光	NDVI	降水	土壤湿度	人口密度	ALB	AOD	O_3	气温
q统计量	0.214	0.058	0.276	0.204	0.162	0.023	0.013	0.048	0.064	0.578

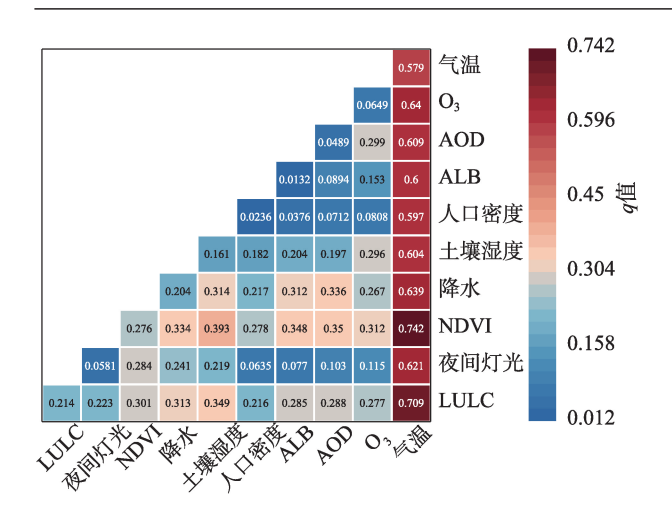


图9　2020年绿洲效应驱动因素的交互作用

Fig. 9　Interaction of the drivers of the oasis effect in 2020

成、空间结构和水热特性不同,造成绿洲效应,形成局地环流[28],植被覆盖和人类活动引起的LULC对其影响显著[29-30],且绿洲面积与夏季绿洲效应存在响应关系[31]。本文对夏季冷岛效应强度与绿洲内部植被覆盖变化进行分析,与绿洲面积相比,植被覆盖与绿洲效应的关系更为密切,且2000—2020年河西绿洲植被覆盖呈上升趋势,这与鲁辉等[32]对河西地区植被的变化趋势研究一致。

在河西地区气候显著变化背景下[33-34],定量研究绿洲效应影响因素,第一,发现气候因素是主控因素,同时期河西地区具有潜在的逆沙漠化趋势,亦受控于气候因素[35],第二,本文发现任意两类因子间的交互作用均为增强,尤其是气温与其他因子显著增强,例如O_3单因子解释力较小,但其与其他因子的交互作用却显著增大。有相关研究表明,人类活动产生的CO和NO_2以及CO_2等气体,受气象条件的影响,易发生光化学反应而产生近地面O_3[36],而O_3浓度升高会对绿洲区植被产生一定的危害,进而影响植被的降温效应。这一方面说明人类活动所产生的气体会间接影响绿洲效应,应减少污染物排放和完善绿洲城市污染物排放检测体系,另一方面说明自然与社会经济间因子的交互作用对绿洲效应的影响不容忽视,未来需进一步研究多种因素对绿洲效应的综合影响。

在绿洲地区,沙漠化过程受控于人类活动影响下的地下水变化[35],近年来,河西绿洲平原区地下水位整体呈现持续降低的演变趋势[10],其主要原因为农业灌溉用水量显著增大,长期地下水采补不平衡威胁区域生态安全,不利于绿洲效应的发挥。因此,在绿洲区应当合理开采地下水,完善水资源配置格局,聚焦耕地高质量发展与保护[37],加强河西走廊生态建设和农业发展的长期监测和定期评估[38-39];推进生态工程,改善空气质量,优化城市结构[40-41],提升干旱区绿洲生态系统的稳定性。

已有研究表明[4],绿洲在冬季产生暖岛现象,且反照率是其主要因素。本文发现春秋季也有少量区域呈暖岛现象,主要出现在城市及周边区域,可能与人造地表增多和人为热排放有关。因此,下一步工作可关注绿洲暖岛效应的形成机制和影响因素,为绿洲城市可持续发展提供理论支持。

4　结 论

本文以河西地区荒漠绿洲生态地理单元为研究对象,选用地理探测器模型,选取气候、地表因素、社会经济等驱动因素,分析河西地区绿洲效应时空变化特征及其影响机制。主要结论如下:

(1) 近20 a来,河西绿洲效应季节变化特征具有显著差异,绿洲效应强度总体夏季>春季>秋季>冬季,在春夏冬季呈现持续增强趋势,秋季稍有减弱。昼夜变化不同,白天与相应季节变化相似,但强度更大;在夜间,2000年秋和2010年冬季出现微弱暖岛效应。

(2) 强绿洲效应面积在夏季最大,而绿洲"暖岛"效应面积冬季最大,且在研究期间,前者面积变化稳定,后者呈逐年减小趋势。

(3) 研究民勤和敦煌的绿洲效应足迹发现,民勤绿洲效应足迹有所扩大,由45环增长至2020年的50环,而敦煌绿洲效应足迹20 a前后无明显变化。

(4) 绿洲植被覆盖与绿洲效应强度存在显著负相关关系。河西整体绿洲和局部绿洲(张掖和武威)的绿洲效应强度与绿洲的植被覆盖相关系数分别为−0.917、−0.79、−0.69(P<0.005)。

(5) 分异及因子探测表明,气候与地表因素是河西地区绿洲效应强度的主控因素;交互作用探测显示,任意两种因子的交互作用均显著大于其单因子的解释力,且交互作用类型均表现为双因子增强,其中,气温与植被的交互作用最大。

参考文献(References):

[1]　张强, 胡隐樵. 干旱区的绿洲效应[J]. 自然杂志, 2001, 23(4):

234-236. [Zhang Qiang, Hu Yinqiao. Oasis effect in arid regions [J]. Chinese Journal of Nature, 2001, 23(4): 234-236.]

[2] 苏从先, 胡隐樵, 张永丰, 等. 河西地区绿洲的小气候特征和"冷岛效应"[J]. 大气科学, 1987, 11(4): 390-396. [Su Congxian, Hu Yinqiao, Zhang Yongfeng, et al. The microclimate character and "cold island effect" over the oasis in Hexi region[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1987, 11(4): 390-396.]

[3] Oke T R. Boundary layer climates[J]. Earth Science Reviews, 1987, 27(3): 265.

[4] Bie Q, Xie Y, Wang X Y, et al. Understanding the attributes of the dual oasis effect in an arid region using remote sensing and observational data[J]. Ecosystem Health and Sustainability, 2020, 6(1): 681-694.

[5] Hao X M, Li W H. Oasis cold island effect and its influence on air temperature: A case study of Tarim Basin, Northwest China[J]. Journal of Arid Land, 2016, 8(2): 172-183.

[6] Hao X M, Li W H, Deng Haijun. The oasis effect and summer temperature rise in arid regions-case study in Tarim Basin[J]. Scientific Reports, 2016, 6(1): 35418.

[7] 毋兆鹏, 牛苏娟, 毛敏, 等. 精河流域绿洲"冷岛效应"时空格局遥感研究[J]. 国土资源遥感, 2020, 32(3): 106-113. [Wu Zhaopeng, Niu Sujuan, Mao Min, et al. Remote sensing research on the spatial-temporal pattern of "cold island effect" of oasis in Jinghe River Basin[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2020, 32 (3): 106-113.]

[8] 高原, 刘普幸, 姚玉龙, 等. 基于遥感的石河子绿洲冷岛效应时空变化特征及其影响因子分析[J]. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1319-1331. [Gao Yuan, Liu Puxing, Yao Yulong, et al. Spatial-temporal characteristics and factor analysis of the cold island effect in the Shihezi oasis based on remote sensing images[J]. Journal of Natural Resources, 2015, 30(8): 1319-1331.]

[9] Hao X M, Hao H C, Zhang J J. Soil moisture influenced the variability of air temperature and oasis effect in a large inland basin of an arid region[J]. Hydrological Processes, 2021, 35(6): e14246.

[10] 宋子奕, 鲁程鹏, 吴成城, 等. 2009—2019年河西走廊地下水位时空分布及演变趋势[J]. 水资源保护, 2023, 39(2): 160-167. [Song Ziyi, Lu Chengpeng, Wu Chengcheng, et al. Spatiotemporal distribution and evolution trend of groundwater level in Hexi Corridor from 2009 to 2019[J]. Water Resources Protection, 2023, 39 (2): 160-167.]

[11] 潘莹, 崔林林, 刘昌脉, 等. 基于MODIS数据的重庆市城市热岛效应时空分析[J]. 生态学杂志, 2018, 37(12): 3736-3745. [Pan Ying, Cui Linlin, Liu Changmai, et al. Spatiotemporal distribution of urban heat island effect based on MODIS data in Chongqing, China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(12): 3736-3745.]

[12] 伍健恒, 孙彩歌, 樊风雷. 西藏地表温度时空演变特征及影响因子[J]. 冰川冻土, 2022, 44(5): 1523-1538. [Wu Jianheng, Sun Caige, Fan Fenglei. Spatiotemporal evolution characteristics and influencing factors of land surface temperature (LST) in Tibet[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2022, 44(5): 1523-1538.]

[13] 巩杰, 谢余初, 高彦净, 等. 1963—2009年金塔绿洲变化对绿洲景观格局的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(3): 603-612. [Gong Jie, Xie Yuchu, Gao Yanjing, et al. Spatio-temporal change and its effects on landscape pattern of Jinta oasis in arid China from 1963 to 2009[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(3): 603-612.]

[14] 吕利利, 颉耀文, 张秀霞, 等. 1986—2015年瓜州绿洲变化[J]. 生态学报, 2017, 37(16): 5482-5491. [Lv Lili, Xie Yaowen, Zhang Xiuxia, et al. Changes in Guazhou oases between 1986 and 2015[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(16): 5482-5491.]

[15] 张强, 胡隐樵. 绿洲地理特征及其气候效应[J]. 地球科学进展, 2002, 17(4): 477-486. [Zhang Qiang, Hu Yinqiao. The geographicalfeatures and climatic effects of oasis[J]. Advances in Earth Science, 2002, 17(4): 477-486.]

[16] Liang S L. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo I: Algorithms[J]. Remote Sensing of Environment, 2001, 76 (2): 213-238.

[17] 李午阳, 兰鑫灿, 唐家乐, 等. 地表反照率和蒸散发对秦巴山地增温效应的影响[J]. 山地学报, 2022, 40(4): 614-625. [Li Wuyang, Lan Xincan, Tang Jiale, et al. Influence of albedo and evapotranspiration on the mass elevation effect in the Qinling-Daba Mountains of China[J]. Mountain Research, 2022, 40(4): 614-625.]

[18] 张秀, 王旭红, 郑玉蓉, 等. 气溶胶光学厚度和不透水地表覆盖度对城市热岛强度的影响——以关中地区为例[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8965-8976. [Zhang Xiu, Wang Xuhong, Zheng Yurong, et al. Effects of aerosol optical depth and impervious surface percentage on urban heat island intensity: A case study in Guanzhong Region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(22): 8965-8976.]

[19] 乔治, 田光进. 基于MODIS的2001—2012年北京热岛足迹及容量动态监测[J]. 遥感学报, 2015, 19(3): 476-484. [Qiao Zhi, Tian Guangjin. Dynamic monitoring of the footprint and capacity for urban heat island in Beijing between 2001 and 2012 based on MODIS[J]. National Remote Sensing Bulletin, 2015, 19(3): 476-484.]

[20] 李双双, 张玉凤, 张立伟, 等. 2000—2019年秦岭南北实际蒸散发时空变化特征[J]. 地理科学进展, 2021, 40(11): 1900-1910. [Li Shuangshuang, Zhang Yufeng, Zhang Liwei, et al. Spatio-temporal variation of actual evapotranspiration in the south and north of the Qinling Mountains during 2000-2019[J]. Progress in Geography, 2021, 40(11): 1900-1910.]

[21] 郝嘉楠, 高泽阳. 城市景观格局与地表温度的定量关系——以兰州市为例[J]. 商丘师范学院学报, 2020, 36(9): 50-54. [Hao Jianan, Gao Zeyang. Quantitative relationship between urban landscape pattern and surface temperature-taking Lanzhou City as an Example[J]. Journal of Shangqiu Normal University, 2020, 36(9): 50-54.]

[22] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 116-134. [Wang Jingfeng, Xu Chengdong. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, 72 (1): 116-134.]

[23] 王爽, 王承武, 张飞云. 基于FSDAF模型的干旱区典型绿洲城市夏季地表热岛效应时空演变研究[J]. 干旱区地理, 2021, 44(1): 118-130. [Wang Shuang, Wang Chengwu, Zhang Feiyun. Spatiotemporal variations of the summer daytime surface urban heat island of oasis city in arid area based on FSDAF model[J]. Arid Land Geography, 2021, 44(1): 118-130.]

[24] 徐满厚, 刘彤. 绿洲-荒漠过渡带早春自然植被的物种组成及其防风效应[J]. 干旱区研究, 2012, 29(1): 64-72. [Xu Manhou, Liu Tong. Species composition and windproof effect of natural vegetation at an oasis-desert ecotone in early spring[J]. Arid Zone Research, 2012, 29(1): 64-72.]

[25] 王君厚, 周士威, 路兆明, 等. 乌兰布和荒漠人工绿洲小气候效应研究[J]. 干旱区研究, 1998, 15(1): 27-34. [Wang Junhou, Zhou Shiwei, Lu Zhaoming, et al. Studies on the local climate effect of the artificial oasis in the Ulan Buh Desert[J]. Arid Zone Research, 1998, 15(1): 27-34.]

[26] 方创琳. 河西走廊: 绿洲支撑着城市化!——与仲伟志先生商榷[J]. 中国沙漠, 2003, 23(3): 128-130. [Fang Chuanglin. Hexi Corridor: Oasis supporting urbanization!—Discussing with Mr. ZHONG Weizhi[J]. Journal of Desert Research, 2003, 23(3): 128-130.]

[27] 宋晓辉, 金净, 阿拉塔. 在干旱半干旱地区种植旱生牧草华北驼绒藜的建议[J]. 当代畜禽养殖业, 2022(5): 59-60. [Song Xiaohui, Jin Jing, A Lata. Proposal for cultivation of the arid forage North China camelina in arid and semi-arid areas[J]. Modern Animal Husbandry, 2022(5): 59-60.]

[28] 安志山, 张克存, 谭立海, 等. 论沙漠-绿洲过渡带的风沙防护效应[J]. 干旱区研究, 2017, 34(5): 1196-1202. [An Zhishan, Zhang Kecun, Tan Lihai, et al. Effect of protection against wind-drift sand over desert-oasis ecotone[J]. Arid Zone Research, 2017, 34(5): 1196-1202.]

[29] 马勇刚, 贡璐, 丁建丽. 塔里木南缘绿洲"冷岛"效应时空变化研究——以于田地区为例[J]. 中国沙漠, 2007, 27(5): 866-869. [Ma Yonggang, Gong Lu, Ding Jianli. Spatial-temporal change of "Cool Island" effect in southern Tarim Basin: A case study in Yutian Oasis[J]. Journal of Desert Research, 2007, 27(5): 866-869.]

[30] 潘竟虎, 张伟强. 张掖绿洲冷岛效应时空格局的遥感分析[J]. 干旱区研究, 2010, 27(4): 481-486. [Pan Jinghu, Zhang Weiqiang. Remote sensing analysis of the spatial-temporal pattern of "Cold Island" effect of Zhangye Oasis[J]. Arid Zone Research, 2010, 27(4): 481-486.]

[31] 别强. 干旱区绿洲效应及影响因素研究——以河西地区为例[D]. 兰州: 兰州大学, 2021. [Bie Qiang. The Characteristics and Influencing Factors of Oasis Effect-A Case Study in Hexi Oasis[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021.]

[32] 鲁晖, 董敬儒, 贺思嘉, 等. 2000—2017年河西地区山地-绿洲-荒漠系统植被变化趋势与可持续性分析[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2021, 57(1): 99-108. [Lu Hui, Dong Jingru, He Sijia, et al. Vegetation change trend and persistence analysis of the mountainoasis-desert system in Hexi region from 2000 to 2017[J]. Journal of Lanzhou University(Natural Sciences), 2021, 57(1): 99-108.]

[33] 林纾, 李红英, 党冰, 等. 甘肃河西走廊地区气候暖湿转型后的最新事实[J]. 冰川冻土, 2014, 36(5): 1111-1121. [Lin Shu, Li Hongying, Dang Bing, et al. The latest evidences of a warm-wet climatic shift in Hexi Corridor, Gansu[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2014, 36(5): 1111-1121.]

[34] 胡晓萌, 张鑫, 雒舒琪, 等. 甘肃省不同气候区1961—2020年蒸散发时空变化及其影响因子[J]. 节水灌溉, 2022(11): 73-78. [Hu Xiaomeng, Zhang Xin, Luo Shuqi, et al. Temporal and spatial changes of potential evapotranspiration and its influencing factors in different climatic regions of Gansu Province from 1961 to 2020 [J]. Water Saving Irrigation, 2022(11): 73-78.]

[35] 朱秉启. 中纬度荒漠区河西走廊沙丘地貌的演化特征及其环境指示[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2710-2729. [Zhu Bingqi. The recent evolution of dune landforms and its environmental indications in the mid-latitude desert area (Hexi Corridor)[J]. Acta Geographica Sinica, 2021, 76(11): 2710-2729.]

[36] 李锦超, 曹春, 方锋, 等. 基于卫星和地面监测的河西走廊O_3浓度时空分布及潜在源区分析[J]. 环境科学, 2023, 44(9): 4785-4798. [Li Jinchao, Cao Chun, Fang Feng, et al. Temporal and spatial distribution of O_3 concentration and potential source area analysis of Hexi Corridor based on satellite and ground monitoring[J]. Environmental Science, 2023, 44(9): 4785-4798.]

[37] 邹易, 蒙吉军. 干旱区绿洲-城镇-荒漠景观演变及生态环境效应[J]. 干旱区研究, 2023, 40(6): 988-1001. [Zou Yi, Meng Jijun. Evaluation of an oasis-urban-desert landscape and the related eco-environmental effects in an arid area[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(6): 988-1001.]

[38] 赵文智, 任珩, 杜军, 等. 河西走廊绿洲生态建设和农业发展的若干思考与建议[J]. 中国科学院院刊, 2023, 38(3): 424-434. [Zhao Wenzhi, Ren Heng, Du Jun, et al. Thoughts and suggestions on oasis ecological construction and agricultural development in Hexi Corridor[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2023, 38(3): 424-434.]

[39] 马柱国, 符淙斌, 谢力, 等. 土壤湿度和气候变化关系研究中的某些问题[J]. 地球科学进展, 2001, 16(4): 563-568. [Ma Zhuguo, Fu Congbin, Xie Li, et al. Some problems in the study on the relationship between soil moisture and climatic change[J]. Advances in Earth Science, 2001, 16(4): 563-568.]

[40] 任丽雯, 王兴涛, 刘明春, 等. 石羊河流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 干旱区研究, 2023, 40(5): 818-828. [Ren Liwen, Wang Xingtao, Liu Mingchun, et al. Temporal and spatial changes and the driving factors of vegetation NPP in Shiyang River Basin[J]. Arid Zone Research, 2023, 40(5): 818-828.]

[41] 刘子龙, 代斌, 崔卓彦, 等. 大气污染物浓度变化特征及潜在源分析——以乌鲁木齐为例[J]. 干旱区研究, 2021, 38(2): 562-569. [Liu Zilong, Dai Bin, Cui Zhuoyan, et al. Concentration characteristics and potential source of atmospheric pollutants: A case study in Urumqi[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(2): 562-569.]

Characterization of spatial and temporal changes in the oasis effect and attribution analysis of the Hexi region in the last 20 years

HOU Wenbing[1,2,3], LI Kaiming[1,2,3,4], HUANG Zhuo[1,2,3]

(1. Faculty of Geomatics, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 2. National-Local Joint Engineering Research Center of Technologies and Applications for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China; 3. Gansu Provincial Engineering Laboratory for National Geographic State Monitoring, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. College of Urban Environment, Lanzhou City University, Lanzhou 730070, Gansu, China)

Abstract: The oasis effect is extremely important for improving the climate of arid areas and supporting the self-sustainability and development of oasis systems. In this study, taking the Hexi region of Gansu Province as the study area, the indicators of oasis effect intensity were selected using meteorological and remote sensing data. The geodetector model was adopted to reveal the spatial and temporal characteristics of the oasis effect over the past 20 years, and the influencing factors of the oasis effect intensity were analyzed qualitatively and quantitatively. The results show that (1) from 2000 to 2020, the oasis effect intensity in the study area had an increasing trend in springs, summers, and winters and a decreasing trend in autumns, and the changes in the daytime are similar to those of the corresponding seasons, but with greater intensity. The strongest was in the summer, with an increase of 1.43 ℃; at night. The changes in springs, summers, and autumns were similar to those of the corresponding seasons, but with a lower intensity, and the weak oasis warming island effect appeared in the nighttime of the autumn of 2000 and the winter of 2010; (2) the area share of strong oasis effect “cold island” is the largest in summers, and the change is small, whereas the area share of oasis “warm island” effect is the largest in winter, with a decreasing trend yearly; (3) the intensity of oasis effect in summer had a strong negative correlation with the change in vegetation cover of oasis, with a correlation coefficient of −0.917. Climate and surface factors are the major controlling factors for the intensity of the oasis effect in the Hexi region. The effect of surface albedo is the weakest, and the interaction between factors should not be neglected.

Keywords: oasis effect; spatial and temporal variation; attribution; geographic probe; Hexi region